

高层大气密度的午夜极大值特征分析与建模*

汪宏波^{1,2†} 张明江^{1,2} 熊建宁^{1,2}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(2 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室 南京 210023)

摘要 利用CHAMP (CHallenging Minisatellite Payload)、GRACE-A (Gravity Recovery and Climate Experiment-A)、SWARM-C (The Earth's Magnetic Field and Environment Explorers-C)等3颗极轨卫星的资料,研究360–480 km高层大气密度在低纬度区域的午夜极大值(Midnight Density Maximum, MDM)现象. MDM一般出现在23:00–02:00 LT (Local Time)之间,峰值位置在低纬度15°以内,谷值位置在中纬度35°–45°附近,整体略偏向南半球,振幅约为平均密度的26%. 随着高度增大以及太阳辐射水平的增强,MDM振幅呈减小趋势;冬至和夏至日附近的季节效应会减弱MDM振幅,在春秋分日的振幅最大. 用3个主流大气模型DTM2000 (Drag Temperature Model 2000), NRLMSISE00 (US Naval Research Laboratory, Mass Spectrometer and Incoherent Scatter radar)和JB2008 (Jacchia-Bowman 2008 model)对MDM进行模拟,JB2008没有刻画出MDM现象;另两个模型低估了MDM效应,在360 km和480 km两个高度DTM2000模型的振幅仅为观测的46%和53%,NRLMSISE00模型仅为观测的33%和26%;模型没有准确刻画出MDM与高度、辐射水平和季节的关系. 联合3颗卫星的资料,研究了一种基于地理纬度的6阶勒让德多项式,同时融合地方时和高度因素的经验函数,在振幅和相位上可以较好地刻画MDM特征,相关系数达到0.923,可为大气密度模型的修正提供借鉴,服务于低轨道航天器高精度轨道预报.

关键词 大气效应; 大气密度模型; 方法: 数据分析

中图分类号: P139; **文献标识码**: A

1 引言

在太阳和地磁活动平静期,来自日地空间环境的能量输入趋于稳定,地球高层大气密度的分布主要受到高度、地方时和季节等因素的综合调制,其中地方时的影响源于太阳天顶角变化引起太阳极紫外辐射路径和加热程度的变化,这会使得大气密度在白天15:00 LT (Local Time)前后出现峰值,夜间04:00 LT附近出现谷值,该现象即为周日效应. 然而,1973年Harper等人利用雷达数据发现在午

夜之后02:00 LT还存在一个温度极大值(Midnight Temperature Maximum, MTM)^[1],随后Hedin等人在OGO-6 (Orbiting Geophysical Observatory 6)卫星质谱仪数据中发现大气氮分子和氧原子在午夜前后达到数密度极大值^[2–3]. 1997年,Arduini等人在San Marco 3 (SM3)和SM5卫星数据中发现地方时23:00–02:00 LT的大气密度在赤道附近达到局部密度峰值^[4]. 这些有别于全球周日效应的局部密度异常,被称为午夜密度极大值现象(Midnight Density Maximum, MDM). Liu等^[5]、Ma等^[6]、

2023-01-04收到原稿,2023-02-13收到修改稿

*国家自然科学基金天文联合基金(U1931136)资助

[†]whb@pmo.ac.cn

Ruan等^[7]研究者利用CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload)资料详细研究了MDM特征,指出它与太阳活动和季节有关,并用物理模型研究了MDM的形成机制^[6].

自2001年以来,3颗极轨卫星CHAMP、GRACE-A (Gravity Recovery and Climate Experiment-A)和SWARM-C (The Earth's Magnetic Field and Environment Explorers-C)以较高的时空分辨率测量高层大气密度.由于极轨道的特点,资料覆盖全球纬度,同时在纬度70°以内同一上升段(或下降段)几乎对应同一地方时,上升和下降段分别处于日照区和阴影区,且相隔12 h(有时恰好处于晨昏线轨道面).当地方时接近时,对不同纬度的连续测量有利于研究大气密度在夜间中低纬度的MDM现象.相比于过去的研究,本文选择以上3颗卫星的资料,时间跨度更长(2001—2021年),通过多星对比和大样本统计研究,可以更清晰地证认MDM特征,且获得具有统计意义的定量结论.

文章首先给出提取MDM特征的方法,并分析地方时、高度、辐射水平、季节等因素对MDM特征的影响,再用DTM2000 (Drag Temperature Model 2000)^[8], NRLMSISE00 (US Naval Research Laboratory, Mass Spectrometer and Incoherent Scatter radar)^[9]和JB2008 (Jacchia-Bowman 2008 model)^[10]对3颗卫星所在高度的MDM进行模拟,并与观测对比研究.最后,尝试采用更精细的经验建模函数,对MDM观测特征进行拟合,为大气模型的修正提供参考.

2 数据和方法

2.1 数据

美国科罗拉多大学基于CHAMP和GRACE卫星加速仪资料,联合GPS接收机对于位置速度的全弧度测量资料进行精密定轨,扣除光压摄动后,由大气阻力摄动模型推导出热层中性气体总密度,数据精度达到 10^{-14} kg/m³的水平.时间分辨率为45 s (CHAMP)和10 s (GRACE).本文还采用欧空局(ESA)发布的基于SWARM-C卫星加速仪资料导出的大气密度数据DNSxACC_2 (cdf格式,网址为

<ftp://swarm-diss.eo.esa.int>),时间分辨率为10 s.由于是极轨卫星,每一圈的资料都能覆盖 $\pm 85^\circ$ 以内的地理纬度,约4个月完整遍历一次0–360°经度.时间范围方面,选用CHAMP卫星2001年5月至2008年12月、GRACE-A卫星2002年4月至2014年12月、SWARM-C卫星2014年12月至2021年5月的观测资料,时间跨度近20 yr.地磁爆发会在高纬度地区产生局部密度扰动,沿着纬度方向传播^[11],造成不同纬度密度的短期涨落.因此,为了研究MDM现象,需选择地磁平静期资料进行研究,判据是:某一天平均地磁指数 A_p 平均值小于10,且前一天3 h地磁指数 A_p 小于等于15.经筛选,CHAMP、GRACE-A和SWARM-C分别有913 d、1873 d、1078 d的资料,相互之间有时间重叠,有利于做对比研究.此外,为避免高度起伏对密度的影响,用文献[12]给出的方法,将每颗星测量的大气密度按线性比例规律归算至其所在的平均高度:CHAMP为360 km、GRACE-A为480 km、SWARM-C为450 km.

2.2 MDM特征提取

首先以天分组,挑选轨道落在阴影区的大气密度,计算南北纬70°之间的大气密度平均值作为基准密度;然后以10°为宽度,计算不同纬度区间的密度平均值,再与基准密度求比值(下文简称“密度比”),可观察每一天大气密度随纬度的连续起伏.为获得统计特征,将多天资料按照不同策略分组(高度、地方时、太阳辐射等),针对相同纬度区间,按照 3σ 准则计算密度比的平均值及标准偏差,最终得到平均密度比曲线,可识别MDM特征,提取赤道附近的密度局部峰值和中纬度附近的2个局部谷值.

我们注意到,日下点的位置变化会引起大气密度的南北半球不对称(夏季半球和冬季半球的差异),对识别MDM的极值、统计平均过程时产生外在干扰,因此尽量选择日下点在赤道附近区域的资料(太阳赤纬在10°以内),对提取MDM特征更有利,而当资料不充分时,会适度扩大到15°门限.

3 结果分析

3.1 个例对比

为展示MDM现象,首先选择同一天的两颗卫

星资料做对比, 图1给出两颗卫星轨道分别落在不同地方时的观测结果. 第1组是2006年3月14日, CHAMP卫星落在夜间半球的地方时为05:17 LT, 接近晨昏时分, 图1 (a)没有明显MDM特征; GRACE-A地方时在23:11 LT, 属于午夜前后, 图1 (b)存在清晰的MDM现象(赤道附近的峰值, 南北半球中纬度地区的两个谷值, 方形阴影区所示). 第2组是

2006年4月19日, CHAMP地方时01:54 LT, 在午夜前后, 图1 (c)有清晰的MDM现象; 而GRACE-A地方时为20:40 LT, 图1 (d)未呈现MDM特征. 对比两颗卫星的同时测量可知: MDM现象只发生在午夜前后(如23:11 LT、01:54 LT), 而在20:40 LT和05:17 LT则没有MDM现象.

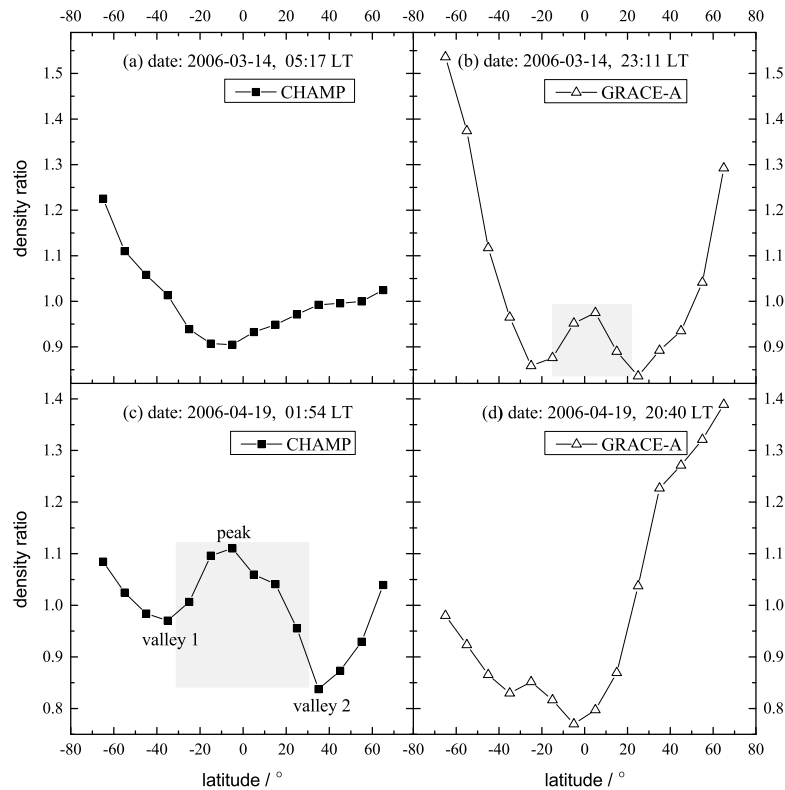


图1 CHAMP和GRACE-A卫星在不同地方时的同时测量及其密度比随地理纬度的变化

Fig. 1 The comparison of CHAMP and GRACE-A's density ratio observation at different local time and its variation with geographic latitude for same days

3.2 影响MDM特征的因素

3.2.1 地方时差异

采用地方时1 h为宽度, 按照22:00—23:00 LT、23:00—0:00 LT、0:00—01:00 LT、01:00—02:00 LT、02:00—03:00 LT、03:00—04:00 LT对资料进行分组, 统计得到不同纬度区间密度比的曲线, 见图2. 每个竖列对应同一颗卫星结果, 自上而下按地方

时区间分成6行, 取各自中值22:30 LT、23:30 LT、00:30 LT、01:30 LT、02:30 LT、03:30 LT做标记, 可以看出: 在22:30 LT (对应22:00—23:00 LT) 3颗卫星都没有记录到MDM现象, 总体特征是高纬度区域密度高, 赤道附近最低. 从23:30 LT (对应23:00—0:00 LT)开始, 3颗卫星都记录到了MDM现象, 在赤道区域出现密度峰值, 南北半球中纬度出现谷值,

随后的0:00—01:00 LT、01:00—02:00 LT波峰不断向南半球移动; 在02:00—03:00 LT, CHAMP的MDM特征依然显著, 而GRACE-A和SWARM-C记录的信号开始减弱, 在03:00—04:00 LT, MDM完全消失. CHAMP的MDM持续时间更长, 可能是高度差异引起的, 间接佐证MDM可能是低层大气波动向上传播所致^[6].

为定量描述MDM特征的强弱, 设计“MDM振幅”统计量: 以图2 (2-b)为例, 对于2.2节获得的不同纬度的密度比, 求 -15° — 15° 的低纬度最大值(记

为 p), 南半球区域 -25° — -45° 最小值(记为 v_1), 北半球区域 25° — 45° 之间的最小值(记为 v_2), 将两个最小值求平均, 视为中纬度密度的背景值, 再用低纬度最大值 p 减去中纬度背景值, 得出MDM振幅

$$\delta = p - \frac{v_1 + v_2}{2}. \quad (1)$$

比较图2中相同卫星不同地方时的振幅, CHAMP和GRACE-A的最大值出现在0:00—01:00 LT, SWARM-C的最大值出现在01:00—02:00 LT.

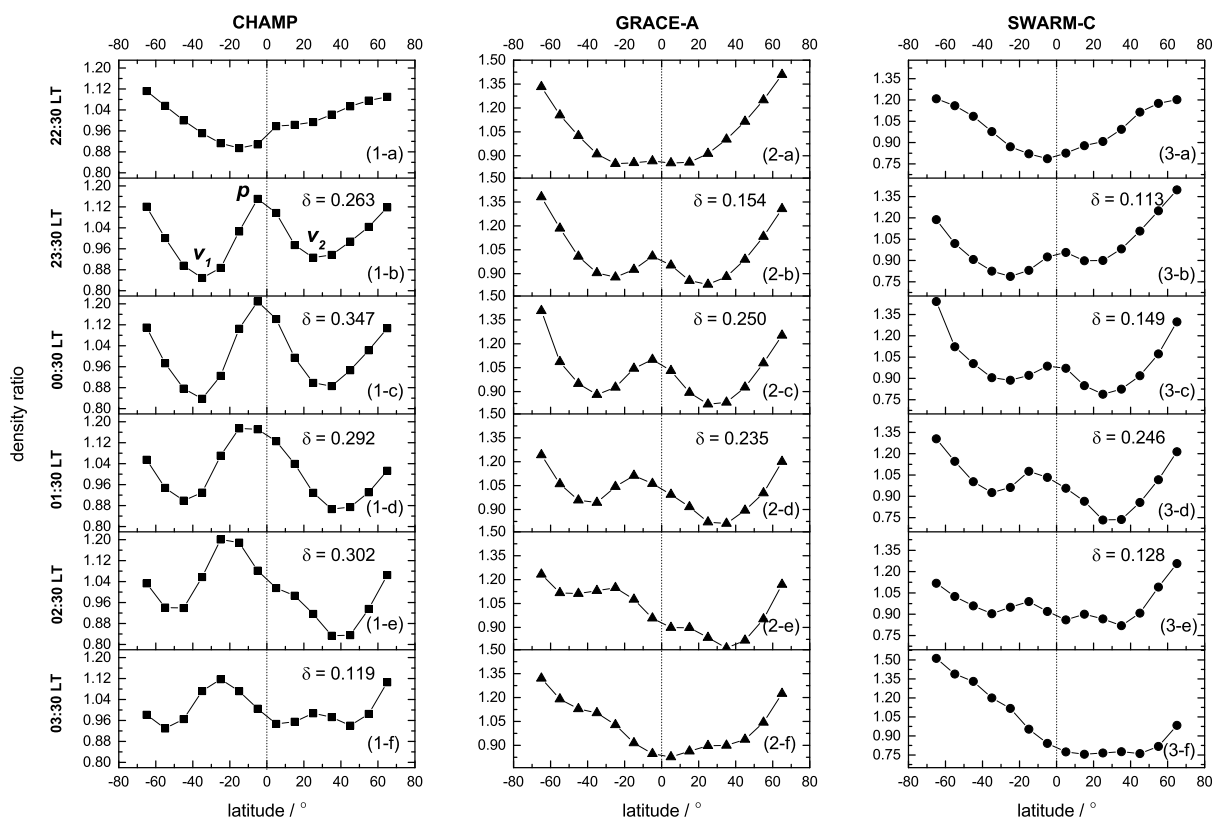


图2 3颗卫星在不同地方时区间的密度比随地理纬度变化的统计结果(CHAMP, GRACE-A和SWARM-C)

Fig.2 The observation of density ratio with geographic latitude at different local time interval based on three satellites (CHAMP, GRACE-A and SWARM-C)

3.2.2 高度差异

为观察不同高度大气的MDM有无差异, 图3给出了CHAMP和GRACE-A在同一天观测的个例对比以及低太阳辐射情形下多天资料的统计比较. 首先选择2005年4月10日CHAMP和GRACE-A

的资料, 两颗星地方时相差仅为0.01 h, 可认为几乎共面, 高度在374 km和481 km, 相差110 km. 两颗星的夜间密度曲线如图3 (a)所示, CHAMP振幅0.3586, GRACE-A振幅0.3109, 后者是前者的87%, 表明高度越高振幅越小.

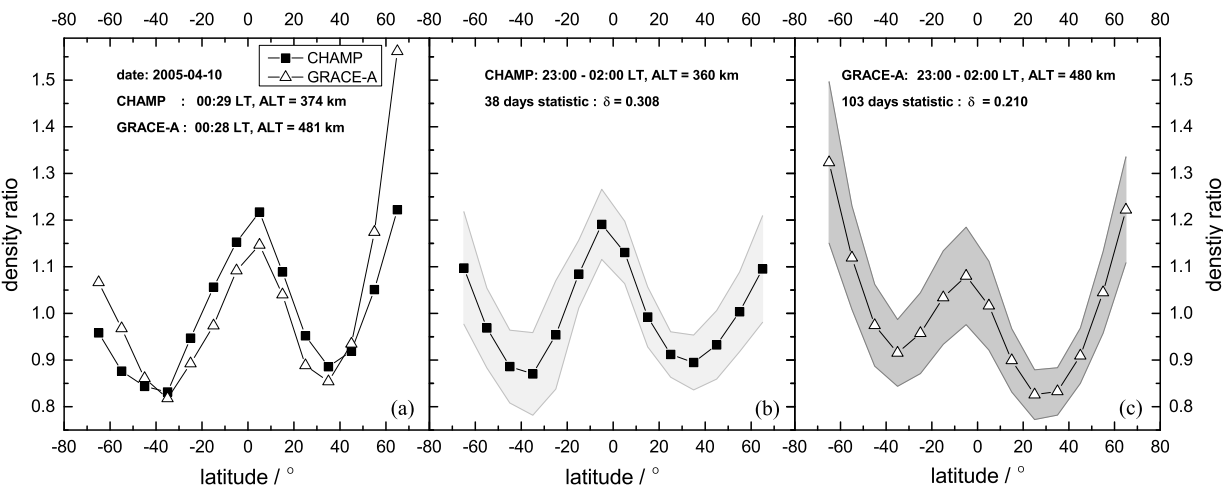


图3 不同高度卫星资料的密度比随地理纬度变化的统计结果(CHAMP, GRACE-A)

Fig. 3 The observation of density ratio with geographic latitude at different altitudes based on CHAMP and GRACE-A

进一步选取更多资料做统计, 资料筛选规则是: 太阳射电辐射流量 $F_{10.7}$ 小于100 sfu ($1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-2}$), 地方时23:00—02:00 LT, 太阳赤纬 10° 以内. CHAMP共38组数据, GRACE-A有103组数据. 图3中(b)和(c)同时给出平均密度比(点线)和误差棒(浅灰色和深灰色阴影轮廓). CHAMP振幅0.308; GRACE-A振幅0.210, 是前者的68%. 因此从统计角度同样表明高度越高, MDM振幅越小.

表1给出3个大气模型在不同高度的模拟结果,

反映出随高度增加振幅减小的趋势, 但在具体数值和下降速率上与观测不一致. 与观测对比结果如下: (1)在360 km、480 km两个高度上, DTM2000模型的振幅仅为观测的46%和53%, NRLMSISE00模型仅为观测的33%和26%; (2)两个高度之间的差异(用GRACE-A所在高度的振幅除以CHAMP所在高度的振幅), 观测为68%、DTM模型为78%, 后者低估了差异; NRLMSISE00为54%, 高估了差异; (3) JB2008则完全没有反映出MDM现象, 无法计算振幅.

表 1 不同高度观测和3个大气模型模拟的MDM振幅

Table 1 The MDM amplitudes of observation at different altitudes and simulation results by 3 atmospheric density models

Satellite	Ave. Altitude	Observation	DTM2000	NRLMSISE00	JB2008
CHAMP	360 km	0.308	0.143	0.101	/
SWARM-C	450 km	0.170	0.126	0.057	/
GRACE-A	480 km	0.210	0.112	0.055	/

3.2.3 辐射水平差异

为观察不同太阳辐射水平下MDM有无差异, 图4给出GRACE-A在辐射差异显著的两天的观测对比以及3种辐射水平的统计比较. 首先选择两天处于不同辐射水平的资料: 2009年3月18日辐射为

69 sfu (弱辐射水平), 2012年9月25日辐射137 sfu (中等辐射水平). GRACE-A在这两天的夜间地方时很接近, 分别为01:07 LT和01:18 LT. 图4 (a)显示MDM振幅分别为0.594 (弱辐射)和0.101 (中等辐射), 后者仅为前者的17%, 可见辐射水平越强

MDM振幅越小.

选择更多的资料进行统计研究, 围绕时间跨度最长的GRACE-A卫星, 选取地方时23:00—02:00 LT、太阳赤纬小于 15° 为总样本, 再按照辐射水平区分成3组: 第1组见图4 (b), 辐射小于80 sfu, 共有104 d资料; 第2组见图4 (c), 辐射介于80—100 sfu, 共有45 d资料; 第3组见图4 (d), 辐射大于100 sfu, 共有19 d资料. 从图4 (b)–(d)的统计结果看, 随着辐射水平增大, 振幅不断减小(0.219、0.127、0.104), 与Ma等人基于CHAMP卫星资料的结论一致^[6]. 用相同分组对CHAMP和SWARM-C的统计结果见表2, 同样证明随着辐射增强, 振幅减弱. 需补充说明的是: 表2中SWARM-C (450 km)的

振幅比GRACE-A (480 km)振幅小, 与上一节“高度越低, MDM 振幅越大”的结论不一致, 可能有两个方面的原因: (1)两颗星高度差异30 km并不显著, 对振幅的影响不够突出; (2)按辐射水平分组之后, 两颗星的样本分布不尽相同, 在高度差异不明显的情况下, 地方时和季节等其他因素干扰了统计结果, 今后需要进一步研究.

使用DTM2000、NRLMSISE00和JB2008模型, 设定高度为480 km, 围绕3个辐射水平进行模拟, 结果见图5. 从图中可见DTM2000的振幅(0.098–0.117)和NRLMSISE00振幅(0.0045–0.047)随辐射水平变化不显著, 没有反映出辐射越强振幅越小的趋势; JB2008模型则没有刻画出MDM现象.

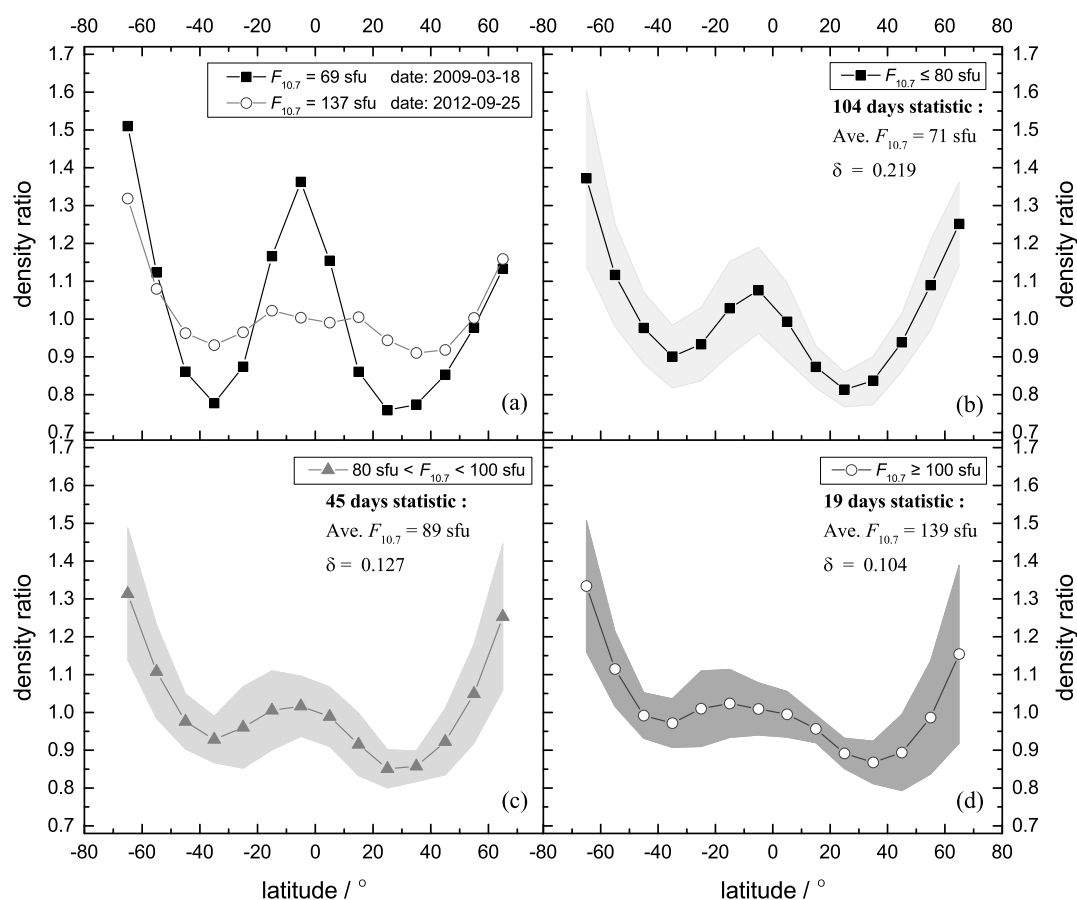


图 4 按不同太阳辐射水平分组统计的密度比(GRACE-A)

Fig. 4 The comparison of density ratio under different solar radiation levels based on the observation of GRACE-A

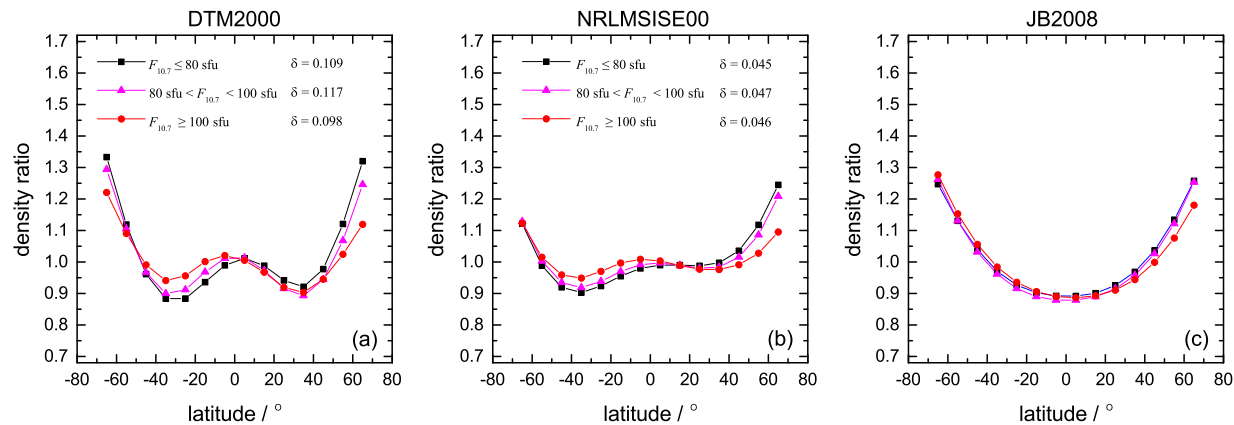


图 5 大气模型对不同辐射水平下MDM的模拟结果(以480 km高度举例)

Fig. 5 The simulated results of MDM by three atmospheric density models under different solar radiation levels (take altitude 480 km as example)

表 2 对于不同辐射水平分组的振幅统计结果
Table 2 The statistical results of MDM's amplitude under different solar radiation levels

Solar radiation level	CHAMP		GRACE-A		SWARM-C	
	Num.	Amp.	Num.	Amp.	Num.	Amp.
$F_{10.7} \leq 80$	45	0.312	104	0.219	84	0.153
$80 < F_{10.7} < 100$	15	0.261	45	0.127	14	/
$F_{10.7} \geq 100$	27	0.182	19	0.104	21	0.059

3.2.4 季节差异

图6给出了3个特殊时间的典型个例对比: 第1行为2007年6月6日, 临近夏至日, 日下点纬度(图中标注sub-solar lat.)在北纬22.59°; 第2行为2006年9月22日秋分日, 日下点纬度在赤道附近(北纬0.46°); 第3行为2007年1月24日, 在冬至日之后, 日下点纬度在南纬19.35°. CHAMP卫星在这3d的阴影区地方时分别为23:54 LT、23:35 LT和0:08 LT, 相互之间很接近. 而且, 辐射流量 $F_{10.7}$ 指数都在80 sfu左右, 地磁极其平静(日均地磁指数 $A_p = 2$), 轨道高度在358–368 km之间. 图6左列是CHAMP观测得到的密度比值, 图(a)、(c)和(e)都展示出清晰的MDM现象, 峰值位置始终位于夏季半球低纬度(图(a)的北纬5°, 图(e)的南纬15°), 比较秋分日(图(c))和至日(图(a)、(e))的振幅, 发现秋分日的振幅大于两个至日的振幅(2.6倍和2倍). 图6的右列给出

了相应的模型结果, JB2008模型未刻画出MDM现象; 在夏冬两个至日, 图(b)和图(f)中DTM2000振幅为0.262、0.284, NRLMSISE00振幅为0.113、0.160, 显著大于秋分日(图(d))的模型振幅(约0.1), 与CHAMP观测所示的“秋分日振幅大于至日”特征恰恰相反. 因此, 模型对季节差异刻画存在较大偏差.

选择更多天的资料, 按照太阳赤纬的范围进行分组统计, 见表3. 第1组是太阳赤纬在北纬15°–23° (夏至日前后); 第2组是太阳赤纬在10°以内 (春分、秋分附近); 第3组是太阳赤纬在南纬15°–23° (冬至日前后). 选取地方时23:00–02:00 LT且 $F_{10.7}$ 小于100 sfu的资料, 样本最充分, 从表3看出: 至点附近(夏至、冬至)振幅普遍比分点(春分、秋分)小, 仅为后者的42%–52% (CHAMP)、48%–59% (GRACE-A)、25%–72% (SWARM-C), 说明季节

效应削减了MDM引起的振幅; 总体看, 峰值位置大多出现在南半球(-5° 和 -15°), 只有CHAMP和

GRACE-A在夏至、SWARM-C在秋分时, 峰值出现在北纬 5° 附近.

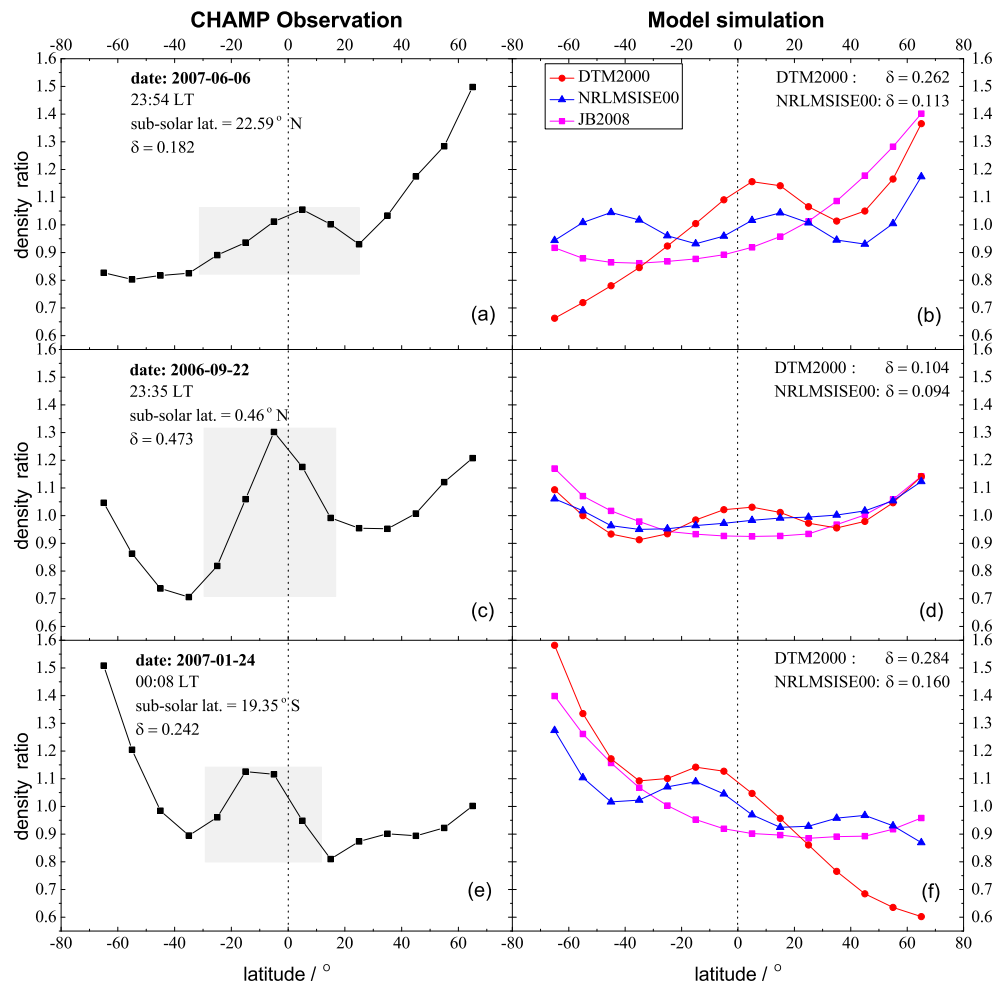


图 6 季节效应对MDM的影响: 夏至、秋分和冬至附近3 d的CHAMP观测和模拟结果

Fig. 6 The seasonal effect on MDM: the CHAMP's observation and models' simulated results on three days around summer solstice, autumn equinox and winter solstice

表 3 不同太阳赤纬时MDM振幅和峰值位置的统计结果
Table 3 The statistical results of MDM's amplitude and peak position with different solar latitude regions

Solar Latitude	CHAMP		GRACE-A		SWARM-C	
	Amp.	Peak pos.	Amp.	Peak pos.	Amp.	Peak Pos.
15° — 23°	0.128	5°	0.101	5°	0.042	-5°
-10° — 10°	0.308	-5°	0.210	-5°	0.170	5°
-23° — -15°	0.161	-5°	0.124	-5°	0.122	-15°

4 MDM特征经验建模

如前文所述, 大气模型对MDM的刻画存在明显不足, 本文尝试基于3颗卫星23:00—02:00 LT的MDM信号, 建立有效的经验函数形式对观测进行拟合, 力求更准确地刻画MDM特征. 经反复试验, 先选择地理纬度的6阶勒让德函数作为基础,

$$y(\varphi) = a_0 + a_1 P_1(\mu) + a_2 P_2(\mu) + a_3 P_3(\mu) + a_4 P_4(\mu) + a_5 P_5(\mu) + a_6 P_6(\mu). \quad (2)$$

再加入与地方时、高度的耦合项

$$y(\varphi, t, Z) = a_0 + [a_1 P_1(\mu) + a_2 P_2(\mu) + a_3 P_3(\mu) + a_4 P_4(\mu) + a_5 P_5(\mu) + a_6 P_6(\mu)] + t \cdot [b_1 P_1(\mu) + b_2 P_2(\mu) + b_3 P_3(\mu) + b_4 P_4(\mu) + b_5 P_5(\mu) + b_6 P_6(\mu)] + Z \cdot [c_1 P_1(\mu) + c_2 P_2(\mu) + c_3 P_3(\mu) + c_4 P_4(\mu) + c_5 P_5(\mu) + c_6 P_6(\mu)], \quad (3)$$

其中 $\mu = \sin \varphi$, φ 是地理纬度, $P_i(\mu)$ 是第 i 阶勒让德函数, 本文取 $i = 1, 2, \dots, 6$, t 是地方时, Z 是高度, a_0, a_i, b_i, c_i 是拟合系数.

图7给出了用不同经验函数对MDM观测特征的拟合情况. 对于单一纬度因素的函数(2)式, 拟合结果如图7 (a), 相关系数 r 为0.738, 标准偏差为0.08, 展示了清晰的MDM特征: 峰值在南纬 5° , 两个谷值在南纬 45° 、北纬 35° , 整体偏向南半球, 中纬度谷值0.91, 赤道附近峰值1.17, 振幅为0.26, 相当于在平均密度为1的比例尺下, MDM引起中低纬度密度大约26%的起伏.

考虑地理纬度因素与高度、辐射、地方时的耦合效应((3)式)后, 整体拟合效果得以显著改善, r 为0.923, 标准偏差为0.046. 分别对每颗星画图和统计, 图7 (b)显示CHAMP资料拟合得最好, r 为0.972; 图7的(c)和(d)分别是GRACE-A和SWARM-C的拟合结果, r 分别为0.868和0.886. 横轴是样本序

号, 分成3组地方时, 拟合曲线与观测符合得较好, 且刻画了不同峰值谷值位置以及与地方时、高度等的关系.

5 结论

利用CHAMP、GRACE-A和SWARM-C等3颗极轨卫星的资料, 研究了大气密度在低纬度区域的午夜极大值(MDM)现象. MDM一般出现在地方时23:00—02:00 LT之间, 峰值位置在低纬 15° 以内, 谷值位置在中纬度 35° — 45° , 整体更偏向南半球, 振幅为平均密度的26%左右. MDM同时受到高度、辐射水平和季节的影响, 随着高度增大及辐射水平的增强, MDM振幅均呈减小趋势; 冬至夏至前后的MDM振幅较弱, 春秋分附近的MDM振幅最大. 将这些观测特征与DTM2000、NRLMSISE00和JB2008模型的模拟结果对比, 发现: (1) JB2008没有刻画出MDM现象; (2)模型低估了MDM振幅, 在360 km、480 km两个高度, DTM2000模型的振幅仅为观测的46%和53%, NRLMSISE00模型仅为观测的33%和26%; (3)模型没有准确刻画MDM与高度、辐射水平和季节的关系.

基于3颗卫星观测资料联合求解, 研究了一种基于地理纬度的6阶勒让德多项式, 同时融合地方时和高度因素的经验函数, 较好地描述了MDM特征, 相关系数为0.923, 标准偏差0.046, 显著优于仅考虑纬度因素的函数形式(相关系数0.738, 标准偏差0.080), 拟合曲线在振幅和相位上与观测符合得较好. 该经验函数可为大气密度模型修正提供参考.

致谢 感谢美国科罗拉多大学提供了基于CHAMP和GRACE卫星加速仪资料反演的大气密度数据(<https://lasp.colorado.edu/space-weather-portal>); 感谢欧空局ESA提供SWARM卫星的数据(<https://earth.esa.int/eogateway/missions/swarm/data>, <ftp://swarm-diss.esa.int>).

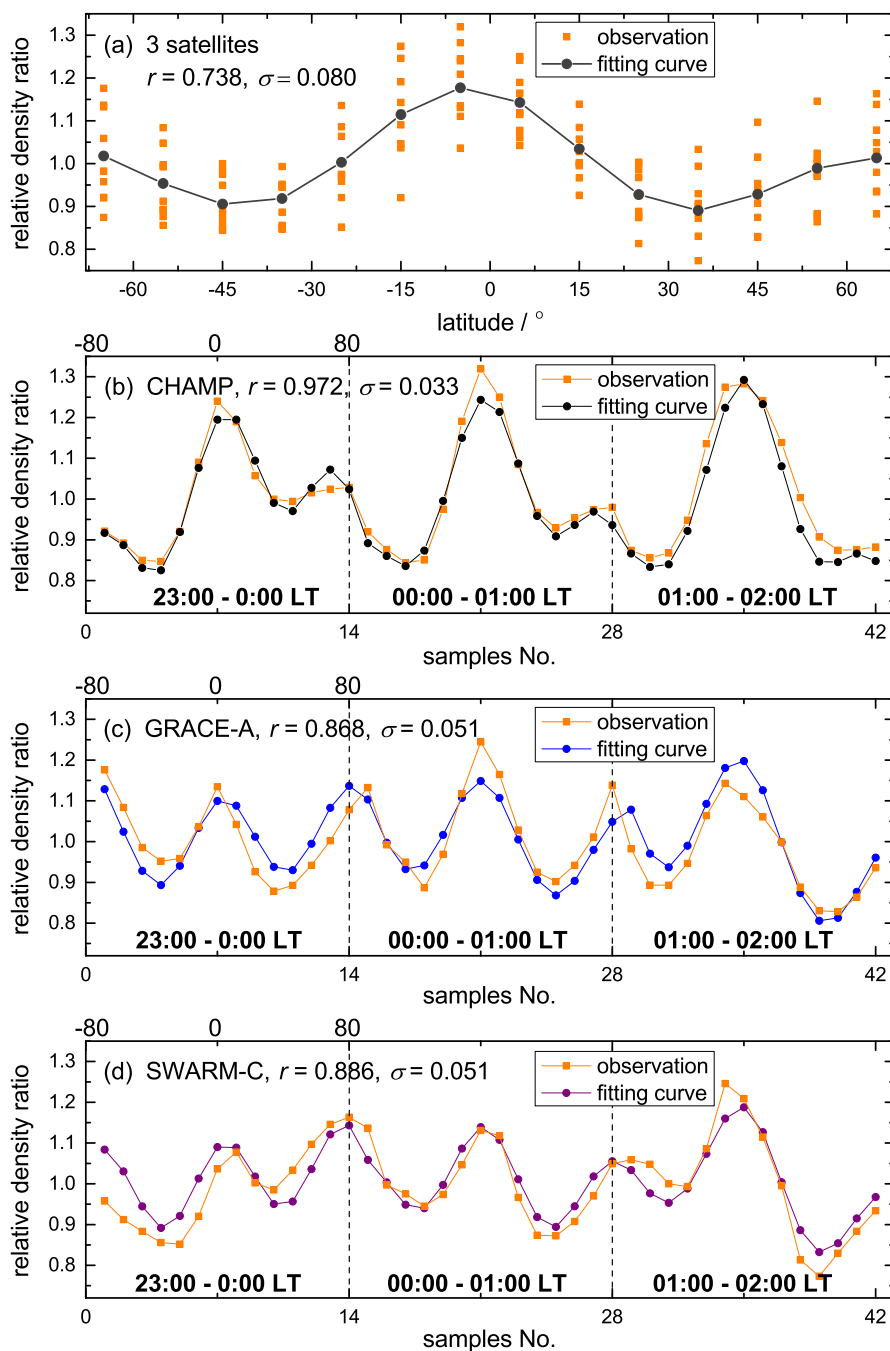


图 7 两种经验函数对MDM观测特征的拟合结果

Fig. 7 The comparison of MDM observation and their fitting curves based on two kinds of empirical function

参考文献

- [1] Harper R M. JATP, 1973, 35: 2023
- [2] Hedin A E, Mayr H G, Reber C A, et al. JGRA, 1974, 79: 215
- [3] Mayr H G, Harris I, Spencer N W, et al. GeoRL, 1979, 6: 447
- [4] Arduini C, Laneve G, Herrero F A. GeoRL, 1997, 24: 377
- [5] Liu H, Lühr H. JGR, 2005, 110: A09S29
- [6] Ma R, Xu J, Wang W, et al. JGR, 2010, 115: A12301
- [7] Ruan H, Lei J, Dou X, et al. JGRA, 2014, 119: 3741
- [8] Bruinsma S, Thuillier G, Barlier F. JASTP, 2003, 65: 1053
- [9] Picone J M, Hedin A E, Drob D P, et al. JGRA, 2002, 107: 1468
- [10] Bowman B R, Tobiska W K, Marcos F A, et al. AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference. Honolulu: Hawaii, 2008: 6438
- [11] 汪宏波. 天文学报, 2010, 51: 435
- [12] Guo J, Wan W, Forbes J M. JGRA, 2007, 112: A10308

The Feature Analysis and Modeling of Upper Atmospheric Midnight Density Maximum

WANG Hong-bo^{1,2} ZHANG Ming-jiang^{1,2} XIONG Jian-ning^{1,2}

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(2 Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

ABSTRACT The features of upper atmospheric midnight density maximum (MDM) around low geographic latitudes are studied based on neutral mass densities data at altitudes 360–480 km, derived from the accelerometer measurements aboard on the three polar orbiting satellites CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload), GRACE-A (Gravity Recovery and Climate Experiment-A) and SWARM-C (The Earth's Magnetic Field and Environment Explorers-C). The MDM appears during the local times from 23:00 to 02:00 LT, whose peak locates at the low latitudes within 15° and two valleys locate at the middle latitudes between 35° and 45° on both hemispheres separately. The structure of MDM drifts toward the southern hemisphere overall. The MDM's amplitude decreases with increases in altitude and solar radiation level. The seasonal effect weakens the MDM's amplitudes around the summer and winter solstices, while the amplitudes around the spring and autumn equinoxes are extremely significant due to the slight seasonal difference between both hemispheres. Three atmospheric density models DTM2000 (Drag Temperature Model 2000), NRLMSISE00 (Naval Research Laboratory Mass Spectrometer and Incoherent Scatter Radar Extended atmosphere model) and JB2008 (Jacchia-Bowman 2008 model) are used to simulate the MDM along these three satellites' orbits, and compared with the observations. It is found that the JB2008 model is failed to describe the MDM, and the other two models underestimate the MDM's amplitudes at altitudes 360 km and 480 km: the simulated amplitudes by the DTM2000 model are 46% and 53% of the observed amplitudes respectively, and only 33% and 26% for the NRLMSISE00 model. These three models are also failed to depict the MDM's variation with altitude, solar radiation level and seasonal effects. In order to correct the model prediction, a 6th-order Legendre polynomial of geographic latitude, coupled with arguments of local time and altitude, is designed to fit the MDM signals from the three satellites' observations. In terms of amplitude and phase of the MDM, the fitting results agree with the observations very well, and the correlation coefficient is 0.923. It indicates that this empirical polynomial could be helpful to the density model correction and high accuracy prediction of spacecrafts in low Earth orbits.

Key words atmospheric effects: atmosphere density model, methods: data analysis